

## Szakmai zárójelentés

A csoporttechnológia (Group Technology = GT) elvi és módszertani alapjaihoz, valamint a kapcsolódó módszerek informatikai alkalmazásaihoz kötődő kutatómunkával a Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén és annak jogelődjén, az Informatikai Tanszéken közel 20 éve foglalkozunk. A jelen OTKA téma közvetlen folytatása a T030243 nyilvántartási számú, „Fogalomhálók és fuzzy módszerek alkalmazása a csoporttechnológiában” című 2002 áprilisában sikeresen lezárt OTKA kutatási témának. A T046913 számú jelen kutatási témában négy megoldandó feladatcsoportot jelöltünk ki, amelyek a következők:

1. Objektumok kiválasztása ekvivalencia, hasonlósági és rendezési relációk alapján a gyártási folyamatok tervezésének támogatására a célszerű hierarchiai szintek figyelembevételével;
2. A termelési, illetve a gyártási folyamatok ütemezése;
3. Munkadarabok csoportjainak kialakítása diszkrét ismérvek (attribútumok) alapján;
4. Intenzitás-alapú optimalizálási feladatok kitűzése és megoldása csoporttechnológiai környezetben.

A kutatást a kitűzött négy feladat által megszabott keretek között végeztük és mind a négy témakörben értünk el új eredményeket.

### **1. Objektumok kiválasztása ekvivalencia, hasonlósági és rendezési relációk alapján a gyártási folyamatok tervezésének támogatására a célszerű hierarchiai szintek figyelembevételével**

A feladat jellegéből következik, hogy itt elsősorban a relációelmélet eszköztárát használva keressük a megoldást. A feladat általános megfogalmazása szerint adottak valamely objektumok a rájuk jellemző tulajdonságokkal úgy, hogy a tulajdonságok közül egyesek feltételei lehetnek az objektumokhoz tartozó más objektumok kiválasztásának; maga a választás lényegében a objektumok és a megoldások közötti kapcsolatok feltárását jelenti. A témakörben elért legjelentősebb eredmény gyártócellák csoporttechnológiai alapú kialakítására vonatkozik. A GT-alapú gyártócellák kialakítására az a felismerés szolgál, hogy azok az alkatrészek kerüljenek egy családba, amelyeknek megmunkálási igénye hasonló, az azonos vagy hasonló technológiával készülő alkatrészcsoportok előállítására alkalmas gépeket pedig egy gyártócellába vonjuk össze. A gyártócellákba összevonható egyedi gépeket (pl. CNC megmunkáló központokat) célszerűen első, a belőlük, továbbá adagoló-elszedő berendezésekből, robotokból, manipulátorokból, és más berendezésekből kialakítható gyártócellákat pedig második hierarchiai szintnek tekinthetjük a tervezés során. A kutatócsoport a szakirodalmi módszerek elemző áttekintése után egy új matematikai módszert dolgozott ki, amely az alkalmazott hálóelmélet egyik dinamikusan fejlődő területén, a fogalom analízisen alapszik. A fogalomhálók alkalmazásával feltártuk a gépek és alkatrészek összerendelésével kapcsolatos viszonyokat, amelyeket az ún. incidenciamátrix tárol. Egy másik háló, az ún. dobozháló segítségével pedig elvégeztük a gépek és alkatrészek osztályozását. Kidolgoztunk egy olyan algoritmust és számítógépi programot, amellyel a dobozháló elemei a fogalomháló ismerete nélkül generálhatók és a keresett osztályozások is előállíthatók. Az eljárást szakirodalmi tesztfeladatokkal összehasonlító elemzésnek vetettük alá és kedvező eredményeket kaptunk. Kapcsolódó publikációk: [4], [9], [14], [19].

A témakörben a Körei Attila által elért új eredmények beépültek az általa 2007-ben benyújtott „Fogalomhálók alkalmazása osztályfelbontási problémákban” című PhD értekezésbe, amelynek munkahelyi vitája 2008. február 5-én sikeresen megtörtént. (tudományos vezető:

Radeleczki Sándor CSc). A disszertáció a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola keretében készült (a doktori iskola vezetője: Tóth Tibor DSc). Az értekezés megvédése 2008. I. félévében esedékes.

## **2. A termelési, illetve a gyártási folyamatok ütemezése**

A diszkrét termelési folyamatok műhelyszintű ütemezése mind elméleti, mind gyakorlati szempontból az erősen modellfüggő és komplex feladatok körébe tartozik. A gyártás gazdaságosságának javítása a tömegesség relatív növelése útján akkor lehetséges, ha hasonló alkatrészek kisebb sorozatait nagyobb sorozatokká vonjuk össze és megmunkálásukhoz GT-bázisú gyártócellákat alakítunk ki. Ezekre a gyártócellákra célszerűen speciális ütemezési módszereket lehet kifejleszteni. A napjaink ipari gyakorlatában egyre fontosabbá váló, rugalmas és igény szerinti tömeggyártás irányítása szintén szükségessé teszi az ismert ütemezési modellek jelentős kiterjesztését a csoportos ütemezés egy másik irányába. A kutatási téma kidolgozása során mindkét kiterjesztési lehetőséggel foglalkoztunk.

A csoport-ütemezés kettőnél több gépet tartalmazó gyártócellákra való kiterjesztésének egy lehetséges modelljét úgy kapjuk, hogy egy súlyozott részben-rendezett halmaz segítségével ábrázoljuk a gyártási (megmunkálási) folyamat egyes fázisai közötti rákövetkezőt. Ennek azon elempárjaihoz, amelyek közvetlenül egymásra következő, vagy össze nem hasonlítható fázispároknak felelnek meg, súlyokat rendelünk (ezek az átszerszámozási időket ábrázolják). Ebből kiindulva, a gyártási (megmunkálási) fázisokat olyan diszjunkt csoportokba osztjuk, ahol az egyes csoportokon belüli fázisok sorrendje nem szigorúan meghatározott, azonban az egyes csoportok között az eredeti rendezés egy lineáris rendezést indukál.

A fenti modell keretében először az így kapott felbontásoknak az alapvető tulajdonságait és egymáshoz való viszonyát elemeztük. Megmutattuk, hogy ezek a felbontások egy ún. Boole-részhálóját képezik egy bővebb (relatív komplementumos) hálónak, amelyet az adott részben-rendezett halmaz ún. rendezés-kongruenciái alkotnak. Algoritmust dolgoztunk ki a tovább már nem finomítható (minimális) lineáris felbontások meghatározására, valamint ezek közül azon fázisfelbontások előállítására, amelyek ún. éleinek az összsúlya minimális. Megmutattuk ezen utóbbi felbontásoknak a részben-rendezett halmaz ún. „mohó dimenziójával” való kapcsolatát is. A részben-rendezett halmazt egy ún. kvázi-rendezett halmazzal helyettesítve, a fenti matematikai modell egy lehetséges általánosítását és ennek tágabb algebrai összefüggéseit is megvizsgáltuk. Eredményeinket az [1], [7], [12], [17] és [20] publikációk tartalmazzák.

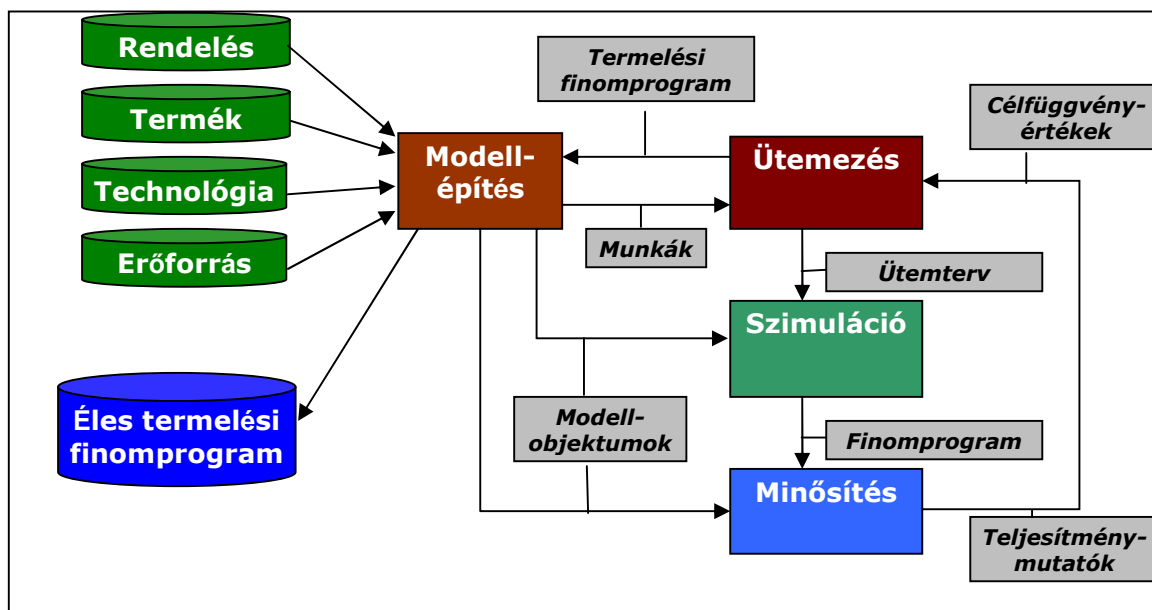
A rugalmas és igény szerinti tömeggyártás irányában a csoportos ütemezés más értelmezést kap. Itt olyan kiterjesztett modell megalkotására volt szükség, amelyben egyszerre jelennek meg a következők:

- (1) több művelet együttes végrehajtására képes összetett gépek (gépsorok);
- (2) párhuzamos gépekből funkciók szerint szervezett gépcsoportok;
- (3) terméktípustól függő végrehajtási útvonal-alternatívák;
- (4) géptől és terméktől függő termelési intenzitások;
- (5) géptől függő változó rendelkezésre állási intervallumok;
- (6) a munkák sorrendjétől függő gép-átállítási idők;
- (7) a munkák indítására és befejezésére vonatkozó időkorlátok.

A felsorolt kritériumok teljesítéséhez egy új, rugalmas Flow Shop ütemezési modell (Extended Flexible Flow Shop, EFFS) kidolgozására volt szükség. Mivel a feladat mérete és

ráfordításai jelentősen meghaladták a jelen OTKA téma lehetőségeit, az EFFE modell kidolgozását és a kapcsolódó szoftverek kifejlesztését nagyrészt más kutatási téma támogatásával végeztük (VITAL – Valós idejű kooperatív vállalatok, NKTH 2/010/2004. projekt), de nyilvánvaló szakmai kapcsolatok miatt az elért eredményeket az OTKA téma kapcsán is megemlítjük. Az OTKA támogatást a [16] publikációban közvetlenül is feltüntettük.

A kidolgozott modell lehetővé teszi a munkák dinamikus kezelését, a belső rendelések összevonását és/vagy szétbontását. Ezek a következőképpen valósulnak meg. A belső rendelések ütemezési alapegységekre bontásával önálló munkák jönnek létre, amelyek ütemezése egymástól függetlenül történik. Az ütemező modul minden egyes munkához hozzárendel egy megfelelő végrehajtási útvonalat, továbbá hozzárendel egy megfelelő gépet a kiválasztott útvonal minden egyes végrehajtási lépésének megfelelő gépcsoportból és meghatározza minden érintett gépen a munkák végrehajtási sorban elfoglalt pozícióját. Ezáltal a munkákat feladatokra bontja fel. A gépeken a gyártási sorozatnagyságok és az azokat elválasztó átállítási műveletek dinamikusan, ütemezés közben alakulnak ki. Az ütemezési folyamat végeredményeképpen egy optimum-közel, megvalósítható ütemterv készül el. A modellnek ez a tulajdonsága a tömeggyártás sorozatnagyság problémájának egy lehetséges új értelmezését nyújtja. A modell egyidejűleg több és változó fontosságú optimalizálási célt, valamint interaktív tervezői beavatkozásokat is képes kezelni a termelésirányítás rugalmasan változó igényeinek kielégítése érdekében. Az ütemező belső struktúrájának vázlata az 1. ábrán látható.



1. ábra Az ütemező belső struktúrájának vázlata

A témakörben több új tudományos eredmény is született, ezeket Kulcsár Gyula „Ütemezési modell és heurisztikus módszerek az igény szerinti tömeggyártás finomprogramozásának támogatására” című PhD értekezése tartalmazza (tudományos vezető: Erdélyi Ferenc CSc). A disszertáció a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola keretében készült (a doktori iskola vezetője: Tóth Tibor DSc). Az értekezés sikeres munkahelyi vitája 2007-ben megtörtént, a védés kitűzött időpontja: 2008. február 25.

### **3. Munkadarabok csoportjainak kialakítása diszkrét ismérvek (attributumok) alapján**

A kitűzött feladatban adott az objektumhalmaz (munkadarabok egy csoportja), illetve ezeknek az objektumoknak különböző tulajdonságai (attribútumai), amelyek közötti kapcsolatot egy táblázattal (egy ún. kontextussal) adjuk meg. Osztályfelbontáson (osztályozáson) az objektumhalmaz egy olyan partícionálását értjük, amelyben az egyes blokkok zártak a bennük szereplő objektumok közös tulajdonságaira nézve.

Az osztályfelbontások létrehozásakor a kontextus ún. fogalomhálójából kiindulva felépítettük azon fogalmak hálóját, amelyek kiterjedései (extenziói) szerepelnek valamilyen osztályfelbontásban – vagyis a kontextus ún. dobozhálóját. Ennek a meghatározására egy új algoritmust és egy ezen alapuló felhasználói felülettel rendelkező számítógépes programot is kidolgoztunk. Ez a Körei Attila által bevezetett algoritmus a kontextushoz tartozó fogalomhálónak csak azokat az elemeit hozza létre, amelyek megkaphatók úgy mint a dobozháló atomjainak az uniói. Az így kapott hálóelemek „atomszerkezetéből” kiindulva az objektumhalmaz bármely (lehetséges) osztályfelbontásának az előállítása könnyen megvalósítható. A dobozháló elemeinek előállítására illetve az osztályfelbontások meghatározására Matlab nyelven írtunk számítógépes programot (az említett feladatok megoldásának ez az első implementációja). Körei Attila a dobozhálót egy, az eredeti objektumhalmazt tartalmazó módosított kontextus fogalomhálójaként is előállította, valamint szükséges és elégséges feltételt bizonyított arra nézve, hogy a vizsgált kontextus dobozhálója és fogalomhálója mikor eshet egybe.

A fentebb vázolt módszert Tóth Tibor, Erdélyi Ferenc és Radeleczi Sándor az (1) témakörhöz tartozó vizsgálatokban is sikeresen alkalmazta projektek megvalósítási idejének előzetes becslésére (lásd pl. [2]-öt). Az ismertetett módszer alapján az objektumhalmaz ún. osztályozási fát is előállíthatjuk. A csoporttechnológiában gyakran merül fel az a kérdés hogy hogyan rendezhetők az egyre finomabb osztályfelbontások alkatrészcsoportjai egy (irányított) fa struktúrába. Ennek a fának a legalsó szintjén a legfinomabb osztályfelbontás alkatrészcsoportjai, az ún. Mitrofanov-féle alkatrésztípusok kell álljanak - ezek a dobozatok extenzióinak felelnek meg. Egy ilyen fát osztályozási fának nevezünk. Az osztályozási fák konstrukciójának egy lehetséges módszere [10]-ben és [20]-ban található. Maximális osztályozási fák előállítására Radeleczi Sándor irányításával Veres Laura doktorandusz hallgató dolgozott ki számítógépre implementálható algoritmust ([15]).

Sikerült megoldanunk azt a fontos gyakorlati feladatot is, hogy feltárjuk, egy új objektumnak a besorolása hogyan befolyásolja a módosult kontextushoz tartozó osztályfelbontásokat és a dobozhálót. Noha a kontextusnak egy új objektummal való bővítése a fogalomháló jelentős megváltozását is okozhatja (- ennek vizsgálatát lásd Daróczy Gabriella Radeleczi Sándor irányításával készült TDK dolgozatában [3]), sikerült megmutatnunk, összhangban a csoporttechnológiai tapasztalatokkal, hogy ilyen ún. elemi bővítés után az új dobozháló bármelyik eleme csak a következők egyike lehet:

- egy már a bővítés előtt meglévő dobozelem,
- egy olyan fogalom, ami úgy keletkezik, hogy egy már meglévő dobozelem extenziójába „besoroljuk” az új objektumot,
- egy olyan dobozelem aminek az extenziója egyedül csak az új elemet tartalmazza.

Ebből az eredményből kiindulva algoritmust és számítógépes programot dolgoztunk ki a dobozháló egy új elem besorolását követő aktualizálására. Ez a program azért is fontos, mert a

segítségével a dobozhálót úgy is megkaphatjuk, hogy egy kisméretű kontextust egy-egy új objektum hozzáadásával bővítünk mindaddig, ameddig a szükséges objektumhalmazt meg nem kapjuk. Ekkor a kiindulási kontextus egyszerű dobozhálójából elemi bővítések sorozatának az eredményeképpen megkapjuk a kívánt kontextus dobozhálóját.

A fenti modell keretében megvizsgáltuk azt is, hogy azok az osztályfelbontások, amelyek blokkjait bizonyos kitüntetett tulajdonságok jellemzik (ezek rendszerint az alkatrészek és az őket megmunkáló gépek kapcsolatát fejezik ki) milyen feltételek mellett maradnak meg egy elemi bővítés során (oly módon, hogy pontosan egy blokkjukba soroljuk be az új elemet). Erre nézve sikerült mind szükséges, mind elégséges feltételt megfogalmaznunk. Ez utóbbi eredmények publikálása folyamatban van.

Ennek a munkatervi pontnak a keretében Tóth Tibor és Körei Attila a kidolgozott módszerek egy új, logisztikai alkalmazását is megvizsgálták csoportos termelési rendszerek esetében. Csoportos termelési rendszer kialakításakor fő célunk a gyártási folyamatban résztvevő munkahelyek csoportosítása, a leghatékonyabb termelési struktúra megtalálása érdekében. Ezekben a rendszerekben az azonos vagy hasonló technológiával készülő alkatrészcsoporthoz előállításra alkalmas gépeket azonos termelőegységekbe (cellákba) vonjuk össze, úgy, hogy a cellákon belül a gépek kihasználtsága maximális, a cellák közötti alkatrészmozgás pedig minimális mértékű legyen.

Az elmúlt harminc évben a gyártócellák meghatározásának feladatára az elméleti szakemberek számos megoldási technikát dolgoztak ki, a különböző, „klaszterező” eljárások alkalmazásától kezdve a mesterséges intelligencia körébe tartozó módszerekig. Megmutattuk, hogy a dobozhálókra alapuló osztályozási módszer is alkalmazható a feladat megoldására. Eljárásunk azonban nemcsak egy újszerű technikát jelent a számos, már kidolgozott matematikai módszer között, hanem a kapcsolódó elméleti eredmények révén az osztályozás mellett egyéb, a tervezőt segítő szolgáltatást is kínál.

A feladat megoldása során (a többi megoldási módszerhez hasonlóan) az alkatrészek és az azokat megmunkáló gépek kapcsolatát leíró gép-alkatrész incidencia mátrixból indulunk ki, mely a formális kontextussal szoros analógiát mutató fogalom. Az incidencia mátrix ugyanis egy bináris mátrix, melynek elemeiből leolvasható, hogy az adott gyártórendszer egyes gépeinek mely alkatrészeket kell megmunkálniuk. Megfeleltetve a gépek halmazát a  $G$  objektumhalmaznak, a megmunkálendő alkatrészek halmazát az  $M$  attribútum halmaznak, az incidencia mátrixból egyértelműen meghatározható a  $G \times M$  halmaz relációban álló elemeinek  $I$  halmaza. Ezzel előállítottunk egy  $(G, M, I)$  kontextust, amelyből elindíthatjuk a fogalomháló osztályozási rendszereinek előállítására szolgáló algoritmust. Az eredményből leolvasható extenzió-partíciók mindegyike megfelel egy lehetséges gyártócella-kiosztásnak. Megmutattuk, hogy a gyakorlati feladatokban általában elegendő az osztályozási rendszerek közül csak a maximálisakat előállítani, azaz azokat, melyekben bármely két különböző elem szuprémuma a háló legnagyobb elemével egyezik meg. Ezzel a feltétellel, illetve a gyártócellák elemszámára vonatkozó korlátozásokkal kizárhatjuk azokat a felbontásokat, melyek a gépek halmazának érdektelen osztályozásaihoz vezetnek. A korlátozások figyelembevételével megmaradt megoldások közül a legjobbat a megmunkálendő alkatrészek csoportjainak kialakítása után tudjuk kiválasztani. Minden gyártócellához tartozik egy alkatrészcsalád, melynek magját az adott cella gépei által közösen megmunkált alkatrészek jelentik. A kimaradt alkatrészeket pedig abba a családba soroljuk, amelyikben a megmunkálásukat végző gépek aránya a lehető legnagyobb. Ezzel minden egyes gyártócella-rendszerhez hozzárendeltünk egy alkatrészcsalád-rendszert, ahol az összetartozó rendszerek

együttesen jelentik a feladat egy megoldását. A megoldások értékelésére az irodalomban számos mutató ismeretes, melyek közül a legáltalánosabban használt a csoportképzési hatásfok (grouping efficacy). A szempontjainknak leginkább megfelelő egy vagy több mutató segítségével tudjuk a kapott megoldásokat rangsorolni és a legjobbat kiválasztani. Módszerünket az irodalomban fellelhető számos példán tesztelve azt tapasztaltuk, hogy sikerült azokat a cellakiosztásokat megtalálni, melyeket más megbízható megoldási technikák is generálnak. Esetünkben azonban arra is lehetőség van, hogy többféle megoldás közül, a számunkra legfontosabbnak tartott teljesítménymutató alkalmazásával válasszuk ki a legjobbat.

Az osztályozási feladat megoldása mellett a korábban említett elméleti eredményeket is közvetlenül hasznosíthatjuk a gyártócellák meghatározásának feladatában. A gyártórendszerbe beállítandó új gép számára leginkább megfelelő gyártócellát a kontextusbővítésével kapcsolatos eredményekre támaszkodva határozhatjuk meg. A kitüntetett tulajdonságok meghatározásával pedig azokat az attribútumokat (jelen esetben alkatrészeket) kapjuk meg, melyek a cellák előállítása szempontjából a legfontosabb információt hordozzák.

Az elméleti eredményekhez kapcsolódó algoritmusok alapján MATLAB programnyelven eljárásokat írtunk a különböző részfeladatok megoldására. Az eljárások alkalmazásával készítettünk egy felhasználói felülettel is rendelkező programot a gyártócellák meghatározásának feladatára. A program egy tetszőleges betöltött, vagy a felhasználó által elemenként megadott gép-alkatrész incidencia mátrixból kiindulva megadja azt a gyártócella és alkatrészcsalád-kiosztást, mely a csoportképzési hatásfok teljesítménymutató alapján a legjobbnak bizonyult. Legközelebbi terveink között szerepel a szoftver bővítése már megoldott, de még kellőképpen nem tesztelt feladatokkal, illetve további kényelmi funkciókkal.

Az ebben a munkatervi pontban elért új eredményeket az alábbi publikációk tartalmazzák: [2], [3], [4], [5], [6], [9], [10], [11], [14], [15], [17], [18], [19], [20].

#### **4. Intenzitás-alapú optimalizálási feladatok kitűzése és megoldása csoporttechnológiai környezetben**

A jelen OTKA téma elnyerését megelőzően a témavezető és munkatársai a technológiai intenzitás és a fajlagos költségekvalens idő alapján új, nagy általánossági fokú módszert fejlesztettek ki a forgácsolási paraméterek optimális értékeinek meghatározását szolgáló hagyományos módszerek helyett. Az új megközelítési mód hatékonyságát az esztergálás példáján számítógépi programok és tapasztalatok segítségével is alátámasztották és számos nemzetközi fórumon publikálták. Bizonyították, hogy a módszer előnyösen alkalmazható a technológiai előtervezésben, csoporttechnológiai módszerek felhasználásával. A jelen OTKA témában kidolgoztuk a termelési folyamatok intenzitás-alapú modellezésének és optimalizálásának közös, egységes elméleti alapjait öt különböző típusú intenzitás esetére, ezek: (1) anyagleválasztási intenzitás, (2) műveleti intenzitás; (3) termelési intenzitás; (4) tevékenység-intenzitás; (5) igény intenzitás. A termelési folyamatok modellezésében kulcsszerepet játszó három makroparaméter (amelyeket az angol nyelvű szakirodalomban „performance indices” gyűjtőnévvel jelölnek) nevezetesen a szállítókészség, készletszint és kapacitáskihasználás kapcsolatait vizsgáltuk az intenzitás-típusú változókkal („termelési-háromszög” modell). Felhasználva az egygépes gyártórendszer dinamikus modelljét, Erdélyi Ferenc és Tóth Tibor bebizonyította, hogy a termelési háromszög három makroparamétere

között az átlagos termelési intenzitás létesít matematikai kapcsolatot. Ez új tudományos eredmény, amelyet tudomásunk szerint eddig sehol sem publikáltak. Újabb szimulációs eredmények (v.ö. Kulcsár Gyula PhD értekezése) azt támasztják alá, hogy a levezetett formula többgépes gyártórendszer esetében is érvényben marad; az elért eredmények teljes mértékben általánosíthatók csoporttechnológiai környezetre, mivel az átlagos intenzitás fogalma éppen a mindenkori csoport reprezentálásához rendelhető hozzá a termelés, ill. gyártás különböző hierarchiai szintjein. Az új eredményeket a TMCE 2006 rangos nemzetközi konferencián megtartott előadásunkon részben már publikáltuk [8], további eredményeket a TMCE 2008 konferenciára előterjesztett és elfogadott előadásunk tartalmaz [22].